

Dobór sprzętu budowlanego koparek i samochodów samowyładowczych w aspekcie minimalizacji emisyjności CO₂ z wykorzystaniem metod prognostycznych

Magdalena Rogalska

*Katedra Inżynierii Procesów Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury,
Politechnika Lubelska, e-mail: mada.rogalska@gmail.com*

Streszczenie: W pracy podjęto próbę prognozowania emisyjności CO₂ przez zestaw maszyn koparka i samochód samowyładowczy. Emisyjność dwutlenku węgla maszyn do wykonania określonego zadania roboczego zależy od wydajności maszyn. W etapie pierwszym pracy prognozowano wydajność koparek. Zebrano dane techniczne i organizacyjne mające hipotetyczny wpływ na wydajność koparek takie jak: pojemność łyżki, rodzaj narzędzia roboczego, kategorię gruntu, ładowność środka transportowego, rodzaj drogi dojazdowej, lata pracy operatora, wilgotność gruntu, odległość wywozu gruntu, temperatura powietrza, awaryjność. Zakodowano zmienne lingwistyczne, przekształcono dane tak by uzyskać najlepsze wyniki. Prognozowano wydajność koparek. Wykorzystano metodę prognozowania regresji wielorakiej. Przeprowadzono analizę autokorelacji i autokorelacji cząstkowej reszt oraz analizę wrażliwości. Obliczono błędy MAPE prognoz. Na podstawie otrzymanego modelu prognostycznego wykonano przykład obliczeniowy doboru maszyn w aspekcie emisyjności dwutlenku węgla. Sformułowano wzór obliczeniowy do kwantyfikacji liczby kilogramów dwutlenku węgla powstającego w czasie wykonywania robót ziemnych. Z przeprowadzonych analiz wynika, że kryterium minimalizacji emisji dwutlenku węgla jest wprost proporcjonalne do pojemności łyżki koparki i ładowności środka transportowego.

Słowa kluczowe: wydajność koparek, emisyjność CO₂, metoda regresji wielorakiej.

1. Wprowadzenie

Planując wykorzystanie maszyn do robót ziemnych jednym z czynników wyboru może być poziom emisyjności dwutlenku węgla. Proponuje się obliczenie liczby kilogramów emitowanego dwutlenku węgla, podczas wykonywania robót ziemnych, przez zestaw maszyn koparkę i samochody samowyładowcze zgodnie ze wzorem (1).

$$D_{CO_2} = \frac{Q \cdot d_1 \cdot dk_{CO_2}}{W_e} + \frac{Q \cdot \rho \cdot s \cdot d_2 \cdot ds_{CO_2}}{L} \quad [\text{kg}] \quad (1)$$

gdzie: D_{CO_2} – emisja dwutlenku węgla powstająca w wyniku pracy koparki i samochodów wyladowczych [kg], Q – liczba m³ wykopu, d_1 – zużycie paliwa przez koparkę [l/m-g], dk_{CO_2} – współczynnik przeliczeniowy emisji dwutlenku węgla ze spalania 1 litra paliwa przez koparkę, ds_{CO_2} – współczynnik przeliczeniowy emisji dwutlenku węgla ze spalania 1 litra paliwa przez samochód samowyładowczy, W_e – prognozowana wydajność eksploatacyjna koparki z uwzględnieniem warunków technicznych i organizacyjnych, ρ – gęstość gruntu [T/m³], s – liczba kilometrów przejazdu samochodu, d_2 – zużycie paliwa przez samochód samowyładowczy [l/km], L – ładowność samochodu [T]

Kluczowym zadaniem jest wyznaczenie wydajności eksploatacyjnej koparek W_e . Tradycyjnie wydajność tą można wyznaczać na podstawie metody opisanej w punkcie 2 artykułu lub też bezpośrednio z Katalogów Norm Rzeczowych. Metody te nie uwzględniają warunków organizacyjnych prowadzenia prac. Proponuje się zastosowanie metody prognozytycznej do wyznaczania wydajności koparek. Metoda ta uwzględnia szereg czynników organizacyjnych mających wpływ na postęp robót. Obliczenia metodą prognozytyczną przedstawiono w punkcie 3 artykułu.

2. Określenie wydajności eksploatacyjnej koparek metodą tradycyjną

Określenie wydajności eksploatacyjnej koparki jednonaczyniowej [4] W_e tradycyjnie wykonuje się zgodnie ze wzorem (2):

$$W_e = 60 \cdot n \cdot Q \cdot S_n \cdot S_s \cdot S_t \cdot S_{w1} \cdot S_{w2} R_x \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (2)$$

gdzie: W_e – wydajność eksploatacyjna koparki [m^3/h], n – liczba cykli roboczych na minutę [$1/\text{min}$], Q – pojemność geometryczna naczynia (łyżki) [m^3], S_n – współczynnik napełnienia naczynia (łyżki) zależny od jej wielkości, kategorii i rodzaju gruntu, S_s – współczynnik spoistości gruntu, równy odwrotności współczynnika spulchnienia $S_s = 1/S_{sp}$, S_t – współczynnik trudności odspojenia gruntu, S_{w1} – współczynnik wykorzystania czasu roboczego, wprowadzony w celu uwzględnienia przerw technologicznych przy załadunku na środki transportowe oraz zmiany stanowisk pracy koparki, S_{w2} – współczynnik wykorzystania czasu roboczego koparki w okresie zmiany roboczej: przy bezpośrednim załadunku urobku na wozy dostawcze $S_{w2}=0,80$, przy pracy na odkład poza krawędź wykopu $S_{w2}=0,87$, R_x – współczynnik wpływu zdarzeń losowych; prawdopodobieństwo sprawnej pracy maszyny.

Współczynnik napełnienia naczynia roboczego S_n przyjmowany jest w zależności od rodzaju osprzętu (przedsiębierny, podsiębierny, zbierakowy, chwytaowy) oraz kategorii gruntu od I do V. Wartości współczynnika S_n zestawiono w tab.1. Wartości współczynników S_t trudności odspojenia gruntu oraz S_{w1} wykorzystania czasu roboczego zestawiono w tab.2.

Tabela 1. Wartości współczynnika napełnienia naczynia roboczego S_n

Kategoria gruntu	Współczynnik napełnienia naczynia roboczego S_n			
	Osprzęt przedsiębierny	Osprzęt podsiębierny	Osprzęt zbierakowy	Osprzęt chwytaowy
I	0,95	0,90	0,80÷0,90	0,50÷0,70
II	0,80	0,80	0,75÷0,90	0,55÷0,70
III	0,75	0,75	0,50÷0,55	0,41÷0,50
IV	0,65	0,65	0,65÷0,80	0,40÷0,60
V	0,65÷0,90	0,65÷0,80	0,35÷0,50	0,25÷0,35

Tabela 2. Wartości współczynników S_t trudności odspojenia gruntu oraz S_{w1} wykorzystania czasu roboczego

Kategoria gruntu	I	II	III	IV
współczynnik S_t	1,00	0,95	0,80	0,70
współczynnik S_{w1}	0,90	0,92	0,95	0,96

3. Określenie wydajności koparek metodą prognostyczną

Celem obliczeń jest określenie wzoru regresyjnego do wyznaczenia wydajności eksploatacyjnej koparek przedsiębiornych, podsiębiernych, chwytakowych i zbierakowych, przy różnych uwarunkowaniach gruntowych, sprzętowych, zasobowych i awaryjności sprzętu. Dane do obliczeń pozyskano podczas budowy autostrady A4, analizowano 95 przypadków obliczeniowych. Jako zmienną zależną przyjęto v_1 , zmiennymi niezależnymi są zmienne od v_2 do v_{12} . Zmienne zestawiono w tablicy 3.

Tabela 3. Zestawienie zmiennych do obliczeń prognostycznych

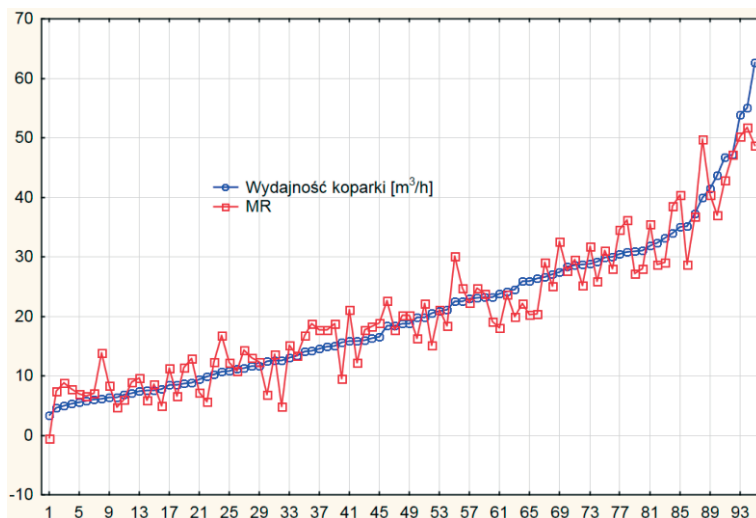
Lp	Zmienna	Opis zmiennej	Uwagi
1	v_1	Wydajność koparki	m^3/h
2	v_2	Rodzaj łyżki koparki	przedsiebnierna – 101; podsiebnierna- 102; chwytakowa – 103; zbierakowa - 104
3	v_3	Pojemność łyżki koparki	m^3
4	v_4	Ładowność środka transportowego	T
5	v_5	Rodzaj drogi	gruntowa – 101; utwardzona - 102
6	v_6	Lata pracy operatora	jako operator koparki
7	v_7	Liczba godzin pracy w dniu roboczym	
8	v_8	Wilgotność gruntu	grunt suchy-101; grunt mokry-102; grunt oblepiający-103
9	v_9	Kategoria gruntu	I-101; II-102; III-103; IV-104
10	v_{10}	Odległość wywozu gruntu	km
11	v_{11}	Temperatura	$^{\circ}C$
12	v_{12}	Awaryjność/naprawa	% czasu efektywnej pracy koparki

Do wyznaczenia modelu regresyjnego zastosowano metodę [1,2,3] regresji wielorakiej MR. Do obliczeń zastosowano metodę regresji wielorakiej wstecznej. W toku obliczeń uzyskano 6 predyktorów v_2 , v_3 , v_6 , v_8 , v_9 i v_{11} – zmienne niezależne v_4 , v_5 , v_7 i v_{10} nie są predyktorami równania regresji. Otrzymano równanie regresyjne postaci (3), podsumowanie regresji zmiennej zależnej v_1 zamieszczono w tabeli 4, wykres zależności zmiennej zależnej v_1 i prognozy MR przedstawiono na rysunku 1. Celem sprawdzenia prawidłowości modelu wykonano obliczenia funkcji autokorelacji reszt i autokorelacji cząstkowej reszt, rysunek 2 i 3. Nie stwierdzono występowania autokorelacji reszt, zatem można uznać, że równanie (3) jest równaniem regresji oraz że szereg resztowy modelu jest białym szumem. Obliczono błąd MAPE [%], wynosi on dla analizowanego modelu 20,14 %. Wynik można uznać za dostatecznie dobry, uwzględniając występowanie zmiennych lingwistycznych oraz pomiary w terenie.

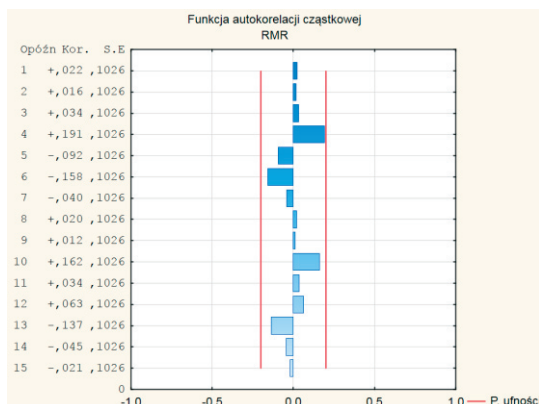
Tabela 4. Podsumowanie regresji zmiennej zależnej

N=95	Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: Wydajność koparki [m ³ /h] R= ,94965421 R ² = ,90184312 Popraw. R2= ,89515061 F(6,88)=134,75 p<0,0000 Błąd std. estymacji: 4,0542					
	b*	Bł. std. z b*	b	Bł. std. z b	t(88)	p
W. wolny			378,6623	71,16112	5,32120	0,000001
v2-Rodzaj łyżki	-0,128231	0,034697	-1,5490	0,41912	-3,69572	0,000380
v3-Pojemność łyżki	0,854513	0,035129	13,3083	0,54710	24,32497	0,000000
v6-Lata pracy operatora	0,231111	0,034439	1,7623	0,26260	6,71084	0,000000
v8-Wilgotność gruntu	-0,128172	0,033969	-2,0725	0,54927	-3,77324	0,000292
v9-Kategoria gruntu	-0,276851	0,034220	-4,2776	0,52872	-8,09036	0,000000
v11-Temperatura	0,123337	0,034789	0,1538	0,04339	3,54531	0,000631

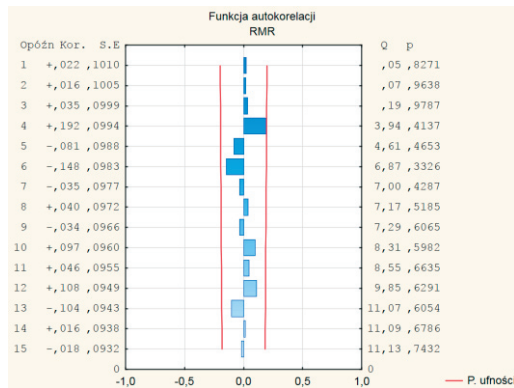
$$v1 = 378,6623 - 1,5490 \cdot v2 + 13,3083 \cdot v3 + 1,7623 v6 - 2,0725 \cdot v8 - 4,2776 \cdot v9 + 0,1538 \cdot v11 \quad (3)$$



Rys. 1. Wykres zależności zmiennej zależnej v1 i prognozy otrzymanej z modelu MR



Rys. 2. Funkcja autokorelacji częściowej reszt modelu MR



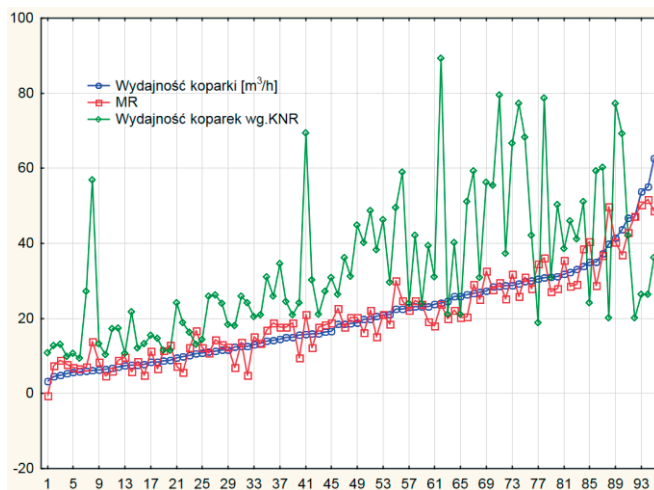
Rys. 3. Funkcja autokorelacji reszt modelu MR

Równanie (1) określające emisję dwutlenku węgla przez zespół maszyn przyjmuje postać (4):

$$D_{CO_2} = \frac{Q \cdot d_1 \cdot dk_{CO_2}}{378,6623 - 1,5490 \cdot v_2 + 13,3083 \cdot v_3 + 1,7623 \cdot v_6 - 2,0725 \cdot v_8 - 4,2776 \cdot v_9 + 0,1538 \cdot v_{11}} + \frac{Q \cdot p \cdot s \cdot d_2 \cdot ds_{CO_2}}{L} \quad (4)$$

gdzie: v_2, v_3, v_6, v_8, v_9 i v_{11} zgodnie z oznaczeniami tab.3.

Porównując wyniki obliczeń metodą prognostyczną z wynikami przeprowadzonych pomiarów oraz danymi z KNR można zauważyć, że wydajność koparek z KNR jest znacznie zawyżona. Zobrazowano to na rysunku 4. Zależności tej nie można potraktować w sposób uogólniony. Metoda prognostyczna dotyczy wyznaczania wydajności zespołów wykonawczych w określonych warunkach realizacyjnych. Dokładność szacowania parametrów prowadzonych prac ma bezpośredni wpływ na terminowość realizowanych kontraktów, a więc i na kondycję finansową przedsiębiorstw. Przyjmując uproszczone dane z KNR zamiast prowadzenia pomiarów i obliczeń, może doprowadzić do przeszacowania wartości.

Rys. 4. Wykres zależności zmiennej zależnej v_1 , prognozy otrzymanej z modelu MR oraz wydajności koparek wg. KNR

4. Przykład obliczeniowy

Należy ustalić, który zestaw maszyn koparka i samochód samowyładowczy będzie powodował mniejszą emisję CO₂ przy wykonywaniu robót ziemnych.

Wykop wielkości 3670 m³ należy wykonać w gruncie kategorii trzeciej, określony jako oblepiający. Transport urobku przewidziano na odległość 1 km. Dane koparek oraz samochodów samowyładowczych podano poniżej:

- Koparka A – Komatsu HB215 LC Hybrid, pojemność łyżki 1,36 m³, podsiębierna, zużycie paliwa 19,6 l/m-g, operator 3 letni staż pracy,
- Koparka B – Komatsu PC 210 LC/NLC-8, pojemność łyżki 1,68 m³, przedsiębiorna, zużycie paliwa 21,2 l/m-g, operator 5 letni staż pracy,
- Samochód samowyładowczy Mercedes Actrosa , ładowność 15,5 T, zużycie paliwa 39 l/100 km,
- Samochód samowyładowczy STAR 25 , ładowność 4 T, zużycie paliwa 26 l/100 km.

Przewidywana średnia temperatura 15°C.

Rozwiązanie:

- Wyznaczenie wydajności koparek A i B przy wykorzystaniu modelu prognostycznego (3)

Tabela 5. Obliczenie wydajności koparki A

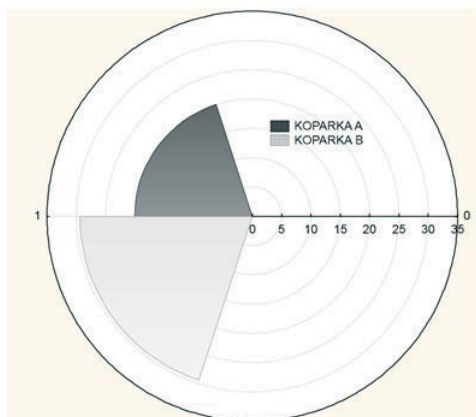
Lp	Zmienna	Koparka A Komatsu HB215 LC HYBRID	Dane	Współczynniki regresji
1		W. wolny		378,6623
2	v2	Rodzaj łyżki	102*	-1,549
3	v3	Pojemność łyżki	1,36	13,3083
4	v6	Lata pracy operatora	3	1,7623
5	v8	Wilgotność gruntu	103*	-2,0725
6	v9	Kategoria gruntu	3	-4,2776
7	v11	Temperatura	15	0,1538
8		Wydajność koparki [m-g/m ³]		20,057188

*Wartości przypisanych kodów przyjęto z tabeli 3

Tabela 6. Obliczenie wydajności koparki B

Lp	Zmienna	Koparka B Komatsu PC210 LC/NLC-8	Dane	Współczynniki regresji
1		W. wolny		378,6623
2	v2	Rodzaj łyżki	101*	-1,549
3	v3	Pojemność łyżki	1,68	13,3083
4	v6	Lata pracy operatora	5	1,7623
5	v8	Wilgotność gruntu	103*	-2,0725
6	v9	Kategoria gruntu	3	-4,2776
7	v11	Temperatura	15	0,1538
8		Wydajność koparki [m-g/m ³]		29,389444

*Wartości przypisanych kodów przyjęto z tabeli 3



Rys. 5. Wykres porównawczy wydajności koparek.

- Obliczenie liczby kilometrów niezbędnych do transportu urobku

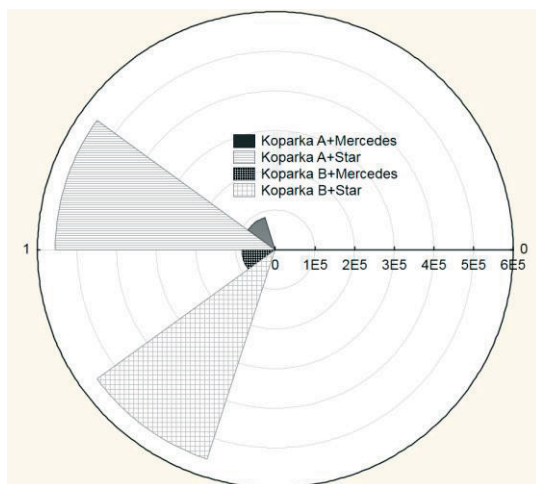
Tabela 7. Obliczenie liczby kilometrów niezbędnej do przejechania podczas realizacji przedsięwzięcia

Lp	Samochód	Ładowność	Liczba kursów	Liczba kilometrów
1	Mercedes Actrosa	15,5 [T]	$3670 \text{ [m}^3] \cdot 1,8 \text{ [T/m}^3] / 15,5 \text{ [T]} = 427$	427
2	STAR25	4 [T]	$3670 \text{ [m}^3] \cdot 1,8 \text{ [T/m}^3] / 4 \text{ [T]} = 1652$	1652

- Obliczenie liczby kilogramów emitowanego dwutlenku węgla przez zestawy maszyn

Tabela 8. Obliczenie liczby kilogramów emitowanego dwutlenku węgla przez zestawy maszyn

Lp	Dane	Jednostka	Koparka A + Mercedes	Koparka A + Star	Koparka B + Mercedes	Koparka B + Star
1	Q	m ³	3670	3670	3670	3670
2	d_1	l/m-g	19,6	19,6	21,2	21,2
3	dk_{CO_2}	kg/l	0,58	0,58	0,63	0,63
4	ds_{CO_2}	kg/l	1,17	0,78	1,17	0,78
5	W_e	m-g/m ³	20,057188	20,057188	29,389444	29,389444
6	ρ	T/m ³	1,8	1,8	1,8	1,8
7	s	km	427	1652	427	1652
8	d_2	l/km	0,39	0,26	0,39	0,26
9	L	T	15,5	4	15,5	4
10	EMISJA CO ₂	kg	85066	555321	84707	554962
11	EMISJA CO ₂	T	85,1	555,3	84,7	554,9



Rys. 6. Wykres porównawczy liczby kilogramów emitowanego dwutlenku węgla przez zestawy maszyn koparka i samochody samowyładowcze.

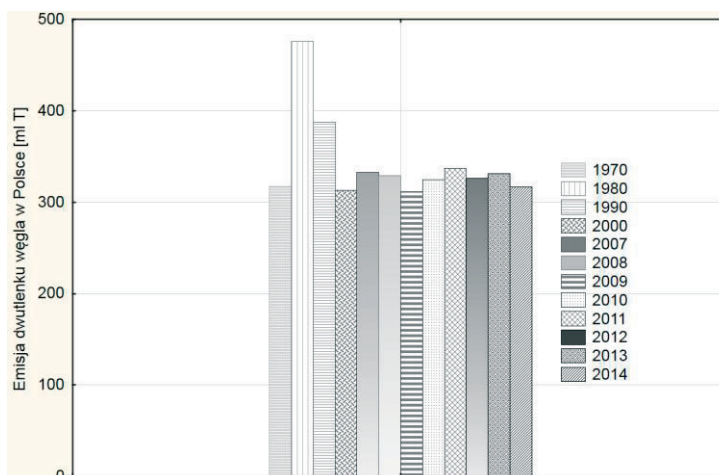
Wnioski:

- najbardziej korzystnym zestawem maszyn do wykonania zaplanowanego przedsięwzięcia pod względem minimalizacji emisyjności dwutlenku węgla jest zestaw Koparka B Komatsu PC210 LC/NLC-8 i samochód samowyładowczy Mercedes Actrosa,
- emisja dwutlenku węgla, podczas realizacji inwestycji, jest wysoka i w najkorzystniejszym przypadku wynosi 84707 kg,
- różnica wielkości emisji CO₂ w przypadku doboru samochodów samowyładowczych o nośności 4T jest 6,5-krotnie wyższa niż w przypadku samochodów o ładowności 15,5T,
- wpływ doboru koparki w odniesieniu do środków transportu na emisję dwutlenku węgla jest niewielki, mniejsza emisyjnością charakteryzuje się koparka o większej pojemności łyżki.

5. Podsumowanie

Emisja dwutlenku węgla pochodzącego ze spalania paliw kopalnych w Polsce jest bardzo wysoka. Zajmujemy pod tym względem 22 miejsce na świecie. W latach 80 i 90 XX wieku (rys.7) nastąpił znaczny spadek emisji CO₂, nadal jednak zajmujemy niechlubne miejsce w czołówce światowej, generując 0,9% produkcji światowej.

Bardzo istotne jest aby ograniczyć emisję dwutlenku węgla w każdym możliwym aspekcie. W pracy przedstawiono sposób doboru maszyn do robót ziemnych w aspekcie minimalizacji emisyjności dwutlenku węgla. Wykazano celowość obliczania wydajności koparek z uwzględnieniem czynników technicznych i organizacyjnych. Sformułowano wzór obliczeniowy do kwantyfikacji liczby kilogramów dwutlenku węgla powstającego w czasie wykonywania robót ziemnych. Z przeprowadzonych analiz wynika, że kryterium minimalizacji emisji dwutlenku węgla jest wprost proporcjonalne do pojemności łyżki koparki i ładowności środka transportowego. Zatem im koparka ma większą pojemność łyżki a samochód samowyładowczy większą pojemność, tym z punktu widzenia minimalizacji emisji CO₂ rozwiązanie jest lepsze.



Rys. 7. Wykres porównawczy emisji dwutlenku węgla pochodzącego ze spalania paliw kopalnych w Polsce

Literatura

- 1 Aczel A.D., Statystyka w zarządzaniu, PWN, Warszawa 2000.
- 2 Kot S., Jakubowski J., Sokołowski A., Statystyka. Difin, Warszawa 2007.
- 3 Podręcznik internetowy STATISTICA, <http://www.statsoft.pl/textbook/sttimser.Htm>
- 4 Martinek W., Nowak P., Woyciechowski P., Technologia robot budowlanych, OWPW, Warszawa 2010.

Selection of construction equipment – excavators and dump trucks in terms of minimizing the emission of CO₂ by using forecasting methods

Magdalena Rogalska

*Department of Construction Project Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture,
Lublin University of Technology, e-mail: mada.rogalska@gmail.com*

Abstract: The article predicted CO₂ emission by a set of machines: excavator and dump trucks. The emissivity of carbon dioxide during the execution of a specific work task depends on the performance of the machines. In the first stage, work performance of excavators was projected. The following technical and organisational data having a hypothetical influence on the performance of excavators were collected: bucket capacity, type of working tool, category of land, load capacity of a mean of transport, type of access road, work experience of an operator, humidity of the soil, distance of the soil disposal, air temperature, failure frequency. The linguistic variables were coded, the data was transformed in a way that ensures that the best results were obtained. The method of multiple regression were used for forecasting. Analysis of the autocorrelation and partial autocorrelation residues and sensitivity analysis was done. MAPE errors forecasts were calculated. On the basis of a predictive model, an example of calculation of selection of machines in

terms of carbon dioxide emission was made. The calculation formula to quantify the number of kilograms of carbon dioxide produced during earthworks was formulated. Analyses showed that the criterion of minimizing carbon dioxide emissions are directly proportional to the excavator's bucket capacity and capacity of means of transport.

Keywords: performance of excavators, CO₂ emission, the method of multiple regression.